

С. О. БАНДУРОВ, Р. С. ЛОЖКИН, Г. О. ШИШКИН

АНАЛІЗ ОБЛАСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СЕРЕДНЬО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОНІВ

У статті представлені результати проведеного аналізу застосування середньо-енергетичних лінійних прискорювачів електронів у різних галузях промисловості. Мета даної роботи полягала у виявленні перспективних напрямів удосконалення прискорювачів електронів, з урахуванням особливостей технологічних процесів в кожній з галузей їх застосування. Проведений аналіз науково-технічної літератури показав, що найбільш перспективним напрямком застосування прискорювачів можуть бути технологічні процеси радіаційної модифікації полімерних оболонок. В даний час широке застосування знайшли вироби, які стискаються під дією температури: плівки і трубки, торцеві заглушки, шланги та інше. Електронні пучки середньої енергії знайшли застосування в технологічних процесах радіаційної вулканізації окремих частин автомобільних покришок, а також виробів з латексу натурального каучуку. Радіаційні технології застосовуються для: обробки продуктів харчування; інгібування овочів; дезінсекції зернових культур; глибокої стерилізації продуктів харчування для продовження терміну їх зберігання тощо. В результаті проведеного аналізу визначено, що для забезпечення більшої продуктивності процесу радіаційної обробки різних матеріалів необхідно: розробляти додаткові пристрої для підвищення продуктивності роботи прискорювачів; вдосконалення систем управління пучком електронів і систем захисту прискорювачів. Окреслені перспективні вдосконалення прискорювачів дозволять підвищити якість опромінення продукції і надійність роботи прискорювачів.

Ключові слова: прискорювачі електронів, радіаційні технології, опромінювання, іонізуюче випромінювання.

С. О. БАНДУРОВ, Р. С. ЛОЖКИН, Г. А. ШИШКИН

АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДНЕ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

В статье представлены результаты проведенного анализа применения средне-энергетических линейных ускорителей электронов в различных отраслях промышленности. Цель данной работы заключалась в выявлении перспективных направлений совершенствования ускорителей электронов, с учетом особенностей технологических процессов в каждой из отраслей их применения. Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что наиболее перспективным направлением применения ускорителей могут быть технологические процессы радиационной модификации полимерных оболочек. В настоящее время широкое применение нашли изделия, которые сжимаются под действием температуры: пленки и трубки, торцевые заглушки, шланги и прочее. Электронные пучки средней энергии нашли применение в технологических процессах радиационной вулканизации отдельных частей автомобильных покрышек, а также изделий из латекса натурального каучука. Радиационные технологии применяются для: обработки продуктов питания; ингибирования овощей; дезинсекции зерновых культур; глубокой стерилизации продуктов питания для продления срока их хранения, и др. В результате проведенного анализа установлено, что для обеспечения большей производительности процесса радиационной обработки различных материалов необходимо: разрабатывать дополнительные устройства для повышения производительности работы ускорителей; совершенствование систем управления пучком электронов и систем защиты ускорителей. Указанные перспективные совершенствования ускорителей позволят повысить качество облучения продукции и надежность работы ускорителей.

Ключевые слова: ускорители электронов, радиационные технологии, облучение, ионизирующее излучение.

S. O. BANDUROV, R. S. LOZHKIN, G. O. SHYSHKIN

ANALYSIS OF AREAS OF APPLICATION OF MEDIUM-ENERGY ELECTRON ACCELERATORS

This work presents the results of an analysis of the most common areas of application of medium-energy linear electron accelerators. The accelerators are most widely used in the electrical, automotive, agricultural and medical industries. The purpose of this work is to identify promising areas for improving electron accelerators, taking into account the characteristics of the technological processes of each of the areas. The article describes the basic materials and products that are subjected to radiation treatment to improve their quality in specific production areas. The conducted analysis showed that most often electron accelerators are used in the technological process of radiation modification of polymer insulation shells of cable-conductor products. Quite widely, electronic processing is used to obtain products that are compressed by temperature: thermally compressible films and tubes, end caps, hoses, and much more. Medium-energy electron beams have found application in the technological processes of radiation vulcanization of individual parts of car tires, as well as products from natural rubber latex. Radiation technologies have recently been increasingly used to process agricultural and food products to inhibit vegetables; grain disinfestations; sterilization of spices, spices, etc.; deep sterilization of food to extend their shelf life, etc. The application of electron accelerators in the sterilization of medical devices is considered: thin-walled packaged medical devices, suture threads, pharmaceutical substances and other medical materials. As a result of the analysis, it was determined that to ensure greater productivity of the radiation processing of various materials, it is necessary: the development of additional devices to increase the performance of accelerators; improvement of electron beam control systems; improvement of accelerator protection systems. The indicated promising improvements of accelerators will improve the quality of product irradiation and increase the reliability of accelerators.

Keywords: electron accelerators, radiation technologies, irradiation, ionizing radiation.

Вступ. Електронні пучки середньої та високої енергії знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості. В роботі [1] авторами наведено такі статистичні дані застосування прискорювачів за галузями технологій радіаційного

зшивання: провідники та кабелі – 35 %; поверхнева вулканізація – 35 %; термоусадочні плівки – 15 %; автомобільні шини – 4 %; послуги – 6 %; інше – 5 %. Питанням промислового застосування прискорювачів електронів активно займаються як вітчизняні, так і

© С. О. Бандуров, Р. С. Ложкін, Г. О. Шишкін, 2019

зарубіжні вчені. Значний внесок у вивчення і розвиток фундаментальних основ взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною і біологічними об'єктами внесли вчені А. Н. Фрумкін, В. І. Спіцин, А. В. Топчієв, Г. І. Будкер, В. І. Гольдандський, А. М. Кузин, А. К. Пікаєв, В. Л. Тальрозе та ін. [2]. В рамках вирішення науково-практичних проблем з радіаційної стерилізації медичних виробів та радіаційної обробки полімерних матеріалів і виробів присвячено великий обсяг робіт узбецькими (М. Ю. Ташметов, Б. Ю. Юлдашев, Ш. Махкамов), китайськими (L. Najie, Z. Mingsheng), польськими (Z. Zimek, I. M. Kaluska), американськими (C. S. Numan, M. R. Cleland, R. W. Hamm), англійськими (G. Burt), індійськими (D. Kanjilal), японськими (K. Takayama, S. Igarashi) та іншими фахівцями [3].

Результати наукових досліджень провідних вчених світу в галузі радіаційної технології, в свою чергу ставлять перед виробниками прискорювальної техніки все нові технічні завдання для задоволення потреб промисловості. Прискорювальна техніка, яка сьогодні експлуатується на більшості виробничих ліній, вимагає розробки додаткових технічних пристроїв та постійного вдосконалення систем контролю, автоматизації і захисту.

Метою статті є проведення аналізу науково-технічної літератури, дисертаційних досліджень, наукових досліджень опублікованих за останні роки, а також систематизація досвіду для визначення перспективних напрямків застосування середньо-енергетичних прискорювачів електронів в електротехнічній, автомобільній, харчовій, медичній та сільськогосподарській промисловості. Даний аналіз корисний для виявлення шляхів вдосконалення та розробки систем управління лінійних прискорювачів електронів з енергіями 300 кеВ–4 МеВ, а також додаткових технічних пристроїв, які підвищують енергоефективність технологічних процесів.

Виклад основного матеріалу.

Провідники та кабелі. Практична значущість обробленого за допомогою радіаційної технології («зшитого») поліетилену була доведена Доулом у 1948 році [4, 5]. Перше промислове виробництво радіаційно-обробленого поліетилену кабельно-провідникової продукції було здійснено компанією General Electric (США) у 1954 році. Отриманий ними кабель вигідно відрізнявся підвищеною механічною міцністю, тепло і термостійкістю. Ґрунтуючись на більш якісні характеристики кабельно-провідникової продукції багато виробничих компаній різних країн почали освоювати новий напрям обробки поліетилену. І вже у 60-х роках минулого століття кабельні вироби з радіаційною обробкою поліетилену досягли промислових об'ємів [6].

Для зшивання поліетилену (ПЕ) найбільш відомі дві технології – радіаційна і хімічна. Обидві технології дозволяють проводити «зшивання» полімеру кабелю. Однак, радіаційні технології мають значні переваги за рахунок можливості збільшення струмового навантаження кабелів і більш тривалої роботи при

високій температурі [7]. Радіаційне зшивання ПЕ, здійснюється за допомогою іонізуючого β і γ випромінювання [6, 8]. У разі необхідності обробки значної товщини полімерного матеріалу використовується γ випромінювання, оскільки воно має високу проникаючу здатність, а в разі обробки малої товщини – β випромінювання. У якості джерела γ випромінювання зазвичай використовується ізотоп кобальту ^{60}Co , період напіврозпаду якого дорівнює 5,2 роки.

Більшого застосування в кабельно-провідниковій промисловості знайшли джерела іонізаційного випромінювання – прискорювачі електронів. Вибір на користь прискорювачів електронів обумовлений їх радіаційною безпекою в процесі експлуатації, оскільки при їх виключенні повністю відсутнє випромінювання, що в свою чергу дозволяє практично відразу зупинити процес радіаційної модифікації матеріалу. На практиці значною популярністю користуються прискорювачі електронів типу ІЛП з енергіями пучка електронів $E = 0,7\text{--}2,5$ МеВ і потужністю пучка $P = 20\text{--}25$ кВт, а також прискорювачі ЕЛВ з енергією пучка електронів $0,4\text{--}2,5$ МеВ і потужністю пучка $P = 25\text{--}100$ кВт.

У процесі опромінення електронним пучком у поліетилені утворюються вільні радикали, які сприяють формуванню рідкісних поперечних зв'язків. При більш тривалому опроміненні зростає кількість поперечних зв'язків, що призводить до утворення просторової структури [9]. Більш детально радіаційно-радикальний механізм зшивання радіаційно-хімічним методом описано у низці наукових робіт [8, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Радіаційний метод зшивання ПЕ дозволив підвищити механічну міцність і хімічну стійкість полімерної ізоляції, а також поліпшити електроізоляційні характеристики і збільшити її термостійкість, що сприяє розширенню можливості застосування кабелів і дротів.

Переважають модифікують ізоляцію виготовлену з поліетилену і полівінілхлориду. Однак завдяки розвитку технологій, розробці, як нових полімерів, так і включенню в них різних домішок, що поліпшують якість продукції – стало можливим збільшити перелік якісних ізоляційних матеріалів та зменшити дози радіаційного поглинання. В свою чергу, це дозволило зменшити витрати на виробництво кабельної продукції.

Кабельна продукція займає основне місце на ринку серед матеріалів, які отримують за допомогою радіаційних технологій. Залежно від товщини кабелів при опроміненні використовують прискорені електрони з енергією від 0,5 МеВ до 4 МеВ, при цьому доза опромінювання, що поглинається становить 0,1–0,5 МГр. Немалий внесок у розвиток технології радіаційної модифікації полімерів кабельних виробів внесли вітчизняні вчені НТУ «Харківський політехнічний інститут» на базі єдиної в Україні кафедри «електроізоляційної та кабельної техніки» на чолі з завідувачем кафедри А. Г. Гурином [16, 17].

Радіаційною обробкою кабелю на основі поліолефінів займався С. В. Скрозніков [9]. Проведенню ґрунтовного аналізу дослідження електричної ізоляції для кабелів середньої напруги на основі зшитого ПЕ низької щільності присвячена робота Г. К. Новікова [18].

Питання технології опромінення ізоляції провідникової продукції розглянуті в роботі А. В. Безпрозваних, І. А. Мірчука [19]. У даній роботі авторами було отримано оптимальні режими опромінення ізоляції провідникової продукції з перетином жили 1 мм² при енергії прискорених електронів 0,5 МеВ. В результаті проведеного авторами дослідження було вивчено вплив коефіцієнта опромінення електронним пучком (ЕП) на механічні та електричні характеристики кабеліної ізоляції на основі безгалогенної композиції. Також даними авторами в роботі [20] представлені результати дослідження розподілу поглиненої дози по периметру і довжині полімерної оболонки суднового кабелю на основі безгалогенного матеріалу в залежності від технологічної дози опромінення. Авторами відзначена існуюча проблема нерівномірності розподілу дози по периметру і довжині кабелю. У зв'язку, з чим було знайдено оптимальні фізико-механічні характеристики оболонки при опроміненні дозами 160–170 кГр з енергією прискорених електронів 1,2 МеВ.

Рішенням проблем пов'язаних з нерівномірністю розподілу дози в процесі опромінення силових кабелів присвячена робота авторів Н. К. Куксанова, С. Н. Фадєєва, Р. А. Салимова, І. Г. Голубенко, Д. А. Когут, А. І. Корчагіна, А. В. Лаврухіна, П. І. Немитова, Е. В. Домарова, А. І. Семенова [21]. У даній роботі автори запропонували використовувати розроблені ними системи кільцевого, двостороннього і чотиристороннього опромінення кабеліної продукції з метою підвищення рівня однорідності поглиненої дози. Реалізована авторами система кільцевого опромінення дозволяє організувати рівномірне за азимутом опромінення ізоляції дроту діаметром до 50 мм за допомогою поворотних електромагнітів, які спрямовують пучок електронів по заданій траєкторії руху. В результаті зміни конфігурації магнітного поля, можливо, отримати систему двостороннього опромінення при багаторазовому проходженні більш тонкого дроту діаметром до 10 мм через робочу зону прискорювача.

Запропонована авторами чотиристороння система опромінення на сьогоднішній день є найбільш популярною при радіаційній модифікації кабеліно-провідникової продукції. Робота даної системи полягає в особливій організації розкладки кабелю, при якій після двох проходів кабелю під випускним вікном прискорювача відбувається опромінення з чотирьох сторін.

В роботі Н. І. Громова, М. Н. Громова, А. І. Ройха, М. Н. Степанова, Н. К. Куксанова, Р. А. Салимова [22] висвітлено практичний досвід використання прискорювачів серії ЕЛВ в складі чотиристоронньої системи опромінення кабеліної продукції. Використання даної системи опромінення, як

стверджують автори, дозволило повністю відійти від розроблених раніше систем опромінення, що в свою чергу не тільки підвищило рівномірність опромінення, а й збільшило продуктивність в цілому.

Варто зазначити, що сьогодні в Україні лідер із застосуванню радіаційних технологій в процесі виробництва кабеліно-провідникової продукції є вітчизняна компанія ТОВ «Азовська кабеліна компанія», яка розташована в м. Бердянськ. Підприємство в своїх технологічних потребах використовує промислові прискорювачі електронів серії ЕЛВ-1 та ЕЛВ-2. На базі даного підприємства виробляється досить широка номенклатура продукції зі «зшитого» поліетилену, а саме: кабелі для атомних електростанцій; кабелі суднові вогнестійкі. Також підприємство виготовляє бортові проводи спеціального призначення з ізоляцією з опроміненого фторопласта та ін. Як видно, використання радіаційних технологій дозволяє отримати кабеліно-провідникові вироби з підвищеними експлуатаційними характеристиками та вимогами до пожежної безпеки.

Термоусадочні плівки і трубки.

Прискорювальна техніка досить активно використовується для «зшивання» полімерних матеріалів, що підлягають модифікації: термоусадочні плівки і трубки, стрічки та ін. При виробництві даних матеріалів враховується ефект пам'яті – здатність радіаційно-зшитих полімерів «запам'ятовувати» вихідну форму. В процесі виготовлення термоусадочних трубок (ТУТ) ефект пам'яті «зшитих» полімерів дозволяє при нагріванні трубки до температури вище за температуру плавлення збільшити діаметр опромінених трубок потоком повітря, а при наступному швидкому охолодженні зафіксувати дану форму. В результаті трубка будучи «надіта», наприклад, на пошкоджену ділянку кабелю, після нагрівання до температури, при якій відбуваються зміни її кристалічної структури, щільно обжимає кабель і забезпечує необхідний механічний та хімічний захист, а також електричну ізоляцію кабелю. Зазвичай енергія електронів для «зшивання» ТУТ залежить від товщини полімерного матеріалу і лежить в діапазоні від 0,5 МеВ до 4 МеВ при дозах 100–250 кГр.

Детально питання радіаційної обробки полівінілхлоридних ТУТ досліджено Н. Б. Ісаматовим в дисертаційній роботі [3]. Автором роботи знайдено оптимальний режим опромінення ТУТ з полівінілхлориду, знайдено залежність механічної міцності ізоляційної трубки від поглиненої дози, а також залежність відносного подовження трубок.

Практичний досвід радіаційної обробки ТУТ був отриманий на підприємстві – ТОВ «Азовська кабеліна компанія». Сьогодні компанією успішно відпрацьована і освоєна технологія опромінення ТУТ на основі кабеліних композицій марки поліетилену 153-10К, 102-10К, основна галузь застосування яких - ізоляція пошкоджених ділянок кабеліних мереж. Основні характеристики ТУТ склали: кратність усадки – до 2,5; міцність при розриві – не менше 100 кгс/см; відносне подовження при розриві – не менше 200 %; подовження

усадка – не більше 10–15 %; робочий температурний режим від -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$; електрична міцність не менше 30 кВ/мм.

Поряд з освоєнням технології опромінення ТУТ підприємством була освоєна технологія опромінення торцевих заглушок з термічною усадкою (ЗТТ), які призначені для забезпечення електричної ізоляції і створення задовільного ущільнення, водонепроникності і стійкості до хімічної корозії кінців, як силових кабелів, так і кабелів зв'язку переважно під час їх транспортування. Енергія для обробки ЗТТ залежить від товщини матеріала ЗТТ, але зазвичай вона лежить в діапазоні 1–4 МеВ, при дозах 100–150 кГр.

Варто зазначити, що на сьогоднішній день також досить активно використовується радіаційна модифікація плівок з термічною усадкою для упаковок, а також стрічок для гідроізоляції сталевих трубопроводів. Енергія пучка електронів для обробки даних виробів лежить в діапазоні 0,5–1 МеВ, а доза становить 50–150 кГр. Також активний розвиток отримала радіаційна модифікація шлангів, труб, манжет з термічною усадкою, які широко застосовуються в промисловості, будівництві, електроенергетиці та інших галузях.

Автомобільні покришки. В теперішній час на початковому циклі процесу виробництва автомобільних покришок, перед формуванням і термічною вулканізацією деякі з елементів майбутньої шини (протекторів, каркаса, бічних стінок і т.д.) обробляють пучком електронів з низькою дозою опромінення 5–20 кГр та енергією електронів 0,5–3 МеВ. У роботах [2, 7] описано перспективи використання автомобільних покришок з радіаційною вулканізацією каучуку.

Обробка елементів шин дозволяє досягти:

- покращення експлуатаційних характеристик протектора;
- підвищення зносостійкості, збільшення зчіпних властивостей з дорожнім покриттям різного типу, зниження гістерезисних втрат на кочення;
- зниження втоми гумовокордних деталей шин (каркас, брекер);
- підвищення зносостійкості на 10–15 %;
- зниження використання дорогих добавок до гумових сумішей: каталізаторів вулканізації, диспергаторів, пом'якшувачів, пластифікаторів, олів та смол, знижуючи загальну тривалість виготовлення покришок на 20 %;
- зниження частки використання дорогих синтетичних і натуральних каучуків;
- зниження частки браку продукції і відходів виробництва.

Також радіаційної вулканізації можуть підлягати вироби з тонкого каучуку, які обробляються прискореними електронами з енергією 0,5–3 МеВ та дозою опромінювання 50–300 кГр. Це можуть бути вироби з латексу натурального каучуку, наприклад рукавички для роботи з радіаційними матеріалами та ін.

Радіаційна обробка сільськогосподарських продуктів. Останнім часом фахівці в галузі харчового

виробництва приділяють багато уваги обробці харчових продуктів електронними пучками високої енергії. Порівняно невеликі дози опромінювання використовують для: інгібування проростання картоплі, цибулі, моркви та інших овочів (0,05–0,15 кГр); дезінсекції зерна, крупи, борошна, сухофруктів (0,15–1 кГр); затримки дозрівання свіжих фруктів (0,2–1,0 кГр); збільшення терміну придатності фруктів, овочів, м'яса, риби (0,5–3 кГр); зберігання харчових продуктів таких як – рибні пресерви, м'ясні напівфабрикати (2,5–4,5 кГр); неповної стерилізації спецій, прянощів, сухофруктів (5–12,0 кГр); глибокої стерилізації продуктів дієтичного харчування, індивідуального раціонального харчування, харчування космонавтів (30–50 кГр) [23]. При цьому енергія електронів може становити 1–2 МеВ, що дає можливість обробляти овочеву продукцію та унеможливує ризик наявності остаточної радіації.

В роботі А. С. Алімова, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговской [24] наведені результати дослідження ефективності використання прискорювача електронів з енергією пучка 1 МеВ для радіаційної обробки картоплі з метою пригнічення проростання і продовження термінів її зберігання. Аналіз результатів проведених досліджень довів ефективність використання потоків електронів з енергією 1 МеВ при дозі 0,2 кГр. Також авторами підкреслено, що дози 0,4 кГр і більше, повністю припиняють подальше проростання картоплі. В роботі [7] також описується факт ефективності використання пучків електронів з дозою 50–150 Гр з метою запобігання проростання картоплі протягом 5–10 місяців.

Стерилізація виробів медичного призначення.

Радіаційні технології знаходять все більше застосування в радіаційній стерилізації виробів медичного призначення. В роботі [3] досить докладно описані результати досліджень радіаційної стерилізації: шовної нитки кетгут, що розсмоктується, а також шовкової нитки; стерилізації латексних рукавичок одноразового застосування; стерилізації сировини фармацевтичних препаратів та інших медичних матеріалів.

Варто відзначити, що зазвичай для радіаційної обробки медичних матеріалів використовують прискорювачі електронів з енергією ЕП 5–10 МеВ тому, що електрони з такою енергією мають значну глибину проникнення. Однак часткове залучення прискорювачів з більш низькою енергією електронів, наприклад серії ЕЛВ-2, в цьому напрямку перспективно для обробки упакованих тонкошарових медичних виробів.

Опис отриманих науково-технічних результатів. Спираючись на проведений аналіз та наш особистий досвід роботи – з метою збільшення якісного показника, рівномірності опромінення, та продуктивності технологічного процесу радіаційної модифікації кабельно-провідникової продукції загалом, нами була розроблена концепція додаткової автоматизованої поворотної системи ЕП на 180° для прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2. На

сьогоднішній день задля забезпечення запобігання аварійних ситуацій, нами було розроблено та зібрано удосконалену систему швидкого захисту при високовольних пробоях для прискорювачів серії ЕЛВ-1, ЕЛВ-2 [25]. Дана система захисту дозволяє в швидкому режимі (за час $\tau \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$ с) відключати прискорювач не тільки у разі виникнення пробойів в високовольному випрямлячі, а й при надходженні аварійних сигналів з других блоків та систем прискорювача, що дозволяє за короткий проміжок часу припинити процес радіаційної обробки різноманітних матеріалів та продуктів при виникненні аварії. Також нами була проведена робота з розробки та конструювання удосконаленої системи захисту від пропалювання фольги випускного вікна промислових прискорювачів серії ЕЛВ-1 [26]. Дана система дозволяє завдяки зв'язку з описаною вище системою швидкого захисту вимикати прискорювач в швидкому режимі під час процесу радіаційної обробки матеріалів у разі виникнення аварій в котушках системи відхилення ЕП. У разі виходу з ладу однієї з котушок порушується розподіл ЕП по фользі випускного вікна прискорювача, що в свою чергу суттєво впливає на радіаційно-технологічний процес, а згодом стає і причиною пропалювання фольги випускного вікна.

Висновки. Проведений аналіз використання прискорювачів електронів у промисловості та технологічних процесах показав, що за останні роки електронні пучки знаходять все більшу область застосування. Перевагою середньо-енергетичних прискорювачів електронів є їх безпека для навколишнього середовища. В процесі роботи вони не утворюють ризиків появи наведеної радіації, забезпечують високу продуктивність і економічну ефективність виробництва, а також безпечні для обслуговуючого персоналу при дотриманні відповідних норм безпеки.

Широке використання прискорювачів електронів у різноманітних технологічних процесах диктує й необхідність розробки додаткових пристроїв, що розширить можливості їх практичного застосування. Однією з актуальних проблем є вдосконалення систем захисту прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2, що застосовуються для різних технологічних цілей, з метою виключення можливості їхньої роботи в режимах аварійних ситуацій. Запобігання тривалій роботи прискорювача в аварійних режимах сприятиме зниженню витрат на його ремонт та мінімізує брак продукції в радіаційно-технологічному процесі. Дана проблема є метою наших подальших досліджень.

Список літератури

1. Robert W. Hamm, Marianne E. Hamm. Industrial Accelerators and their Applications. Edited by: (R&M Technical Enterprises, California, USA), 2012, ch. 3, p. 114.
2. Ершов Б. Г. Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения. Вестник российской академии наук, 2013, том 83, № 10, с. 885-895.
3. Исмаилов Н. Б. Разработка технологий обработки медицинских, полимерных изделий и сырья фармацевтических препаратов на базе радиационно-технологического комплекса. Дис. канд. тех. наук. Ташкент, 2018, С. 142.

4. Marshedian J., Hoseinpour P. M. Polyethylene Cross-linking by Two-step, Silane method: A Review. Iranian Polymer Journal. 2009. № 18 (2). p. 103-128.
5. Peacock A. J. Handbook of Polyethylene, structures properties, and applications. New-York: Marcel Dekker, 2000, 534 p.
6. Иванов В. С. Радиационная химия полимеров. Химия, 1988, 320 с.
7. Абрамян Е. А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 248 с.
8. Сирота А. Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов. Химия, 1984, 150 с.
9. Скрозников С. В. Закономерности формирования структурно-механических свойств сшитых полиолефинов для кабельной техники. Москва, 2015, 148 с.
10. Чарлзби А., пер. с англ. под ред. Мокульский М. А., Финкель Э. Э. Ядерные излучения и полимеры. М.: Издательство иностранной литературы, 1962, 522 с.
11. Финкель Э. Э., Карпов В. Л., Берлянт С. М. Технология радиационного модифицирования полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1983, 48 с.
12. Пьянков Т. Н. [и др.]. Радиационная модификация полимерных материалов. Киев: Техника, 1969, 229 с.
13. Фетесс Е., пер. с англ. под ред. З. А. Роговина. Химические реакции полимеров. М.: Мир, 1967. Том 2. 536 с.
14. Махлис Ф. А. Радиационная физика и химия полимеров. М.: Атомиздат, 1972, 328 с.
15. Гордиенко В. П. Радиационное модифицирование композиционных материалов на основе полиолефинов. К.: Наука думка, 1985, 76 с.
16. Гурин А. Г., Корнилов Е. А., Ложкин Р. С. Перспективы применения сильноточных электронных пучков для радиационной сшивки полиэтилена. Электротехника та електромеханіка. № 4. Харків, 2013, С. 47-51.
17. Гурин А. Г., Корнилов Е. А., Ложкин Р. С. Перспективы применения сильноточных импульсно-периодических индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции. Вісник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 3 (117), «Енергетика: надійність та енергоефективність». С. 47-59.
18. Новиков Г. К. Влияние радиационной сшивки в электрическом газовом разряде на механическую прочность полиэтиленовой кабельной изоляции. Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2017. Vol. 4, no. 2. С. 39-42.
19. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Корреляция между электрическими и механическими характеристиками кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией на основе безгалогенной полимерной композиции. 2018. № 4. С. 54-57.
20. Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A. Distribution of absorbed dose by the perimeter and the length of the polymeric protective sheath at radiaculous irradiation of the ship cable. PAST. 2019. № 5 (123), p. 44-48.
21. Куksанов Н. К., Фадеев С. Н., Салимов Р. А. и др. Технические средства улучшения качества облучения материалов ускорителями ЭЛВ. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11. № 5 (198), С. 950-957.
22. Gromov N. I., Roykh A. I. и др. 35-летний опыт инноваций радиационных технологий на заводе «Подольсккабель». NDT World, 2018, v. 21, no. 1, pp. 52–55 DOI: 10.12737/article_5aaf_998e73ab65. 78306131.
23. Кобылко В. О., И. В. Полякова, В. Я. Саруханов и др. Радиационная обработка пищевых продуктов животного происхождения в целях обеспечения продовольственной безопасности военнослужащих. Международная науч.-прак. конференция, памяти В. М. Горбатова. Изд.-во: "Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова" РАН (Москва). №1, 2018, С.106-110.
24. Алимов А. С., Близнюк У. А., Борщевская П. Ю. и др. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов. Серия физическая, 2017, том 81, № 6, С. 820-82.
25. Пат. 131551 UA, МПК (2018.01) H05H 15/00 G21K 1/00. Система швидкого захисту при високовольних пробоях для прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2 / С. О. Бандуров, u201806193; Заяв. 04.06.2018; Опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2.

26. Bandurov S. O., Lozhkin R. S., Shishkin G. O. Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil. *BAHT*. 2019. № 4 (122). p. 169-173.

References (transliterated)

Robert W. Hamm, Marianne E. Hamm. *Industrial Accelerators and their Applications*. Edited by: (R&M Technical Enterprises, California, USA), 2012, ch. 3, p. 114.

2. Ershov B. G. *Radiacionnye tehnologii: vozmozhnosti, sostoyaniye i perspektivy primeneniya*. Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2013, tom 83, № 10, s. 885-895.

3. Isamatov N. B. *Razrabotka tehnologij obrabotki medicinskih, polimernykh izdelij i syrya farmacevticheskikh preparatov na baze radiacionno-tehnologicheskogo kompleksa*. Dis. kand. teh. nauk. Tashkent, 2018, S. 142.

4. Marshedian J., Hoseinpour P. M. *Polyethylene Cross-linking by Two-step, Silane method: A Review*. Iranian Polymer Journal. 2009. № 18 (2). p. 103-128.

5. Peacock A. J. *Handbook of Polyethylene, structures properties, and applications*. New-York: Marcel Dekker, 2000. 534 p.

6. Ivanov V. S. *Radiacionnaya himiya polimerov*. L.: Himiya, 1988, 320 s.

7. Abramyan E. A. *Promyshlennyye uskoriteli elektronov*. M.: Energoatomizdat, 1986, 248 s.

8. Sirota A. G. *Modifikatsiya struktury i svoystv poliolefinov*. L.: Himiya, 1984, 150 s.

9. Skroznykov S. V. *Zakonomernosti formirovaniya strukturno-mekhanicheskikh svoystv sshitykh poliolefinov dlya kabelnoj tehniki*. Dis.kand. teh. nauk. Moskva, 2015, 148 s.

10. Charlzbi A., per. s angl. pod red. Mokulskij M. A., E. E. Finkel. *Yadernyye izlucheniya i polimery*. M.: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1962, 522 s.

11. Finkel E. E., Karpov V. L., Berlyant S. M. *Tehnologiya radiacionnogo modifizirovaniya polimerov*. M.: Energoatomizdat, 1983, 48 s.

12. Pyankov T. N., [i dr.]. *Radiacionnaya modifikatsiya polimernykh materialov*. Kiev : Tehnika, 1969, 229 s.

13. Fetess E. per. s angl. pod red. Rogovina Z. A. *Himicheskie reakcii polimerov*. M.: Mir, 1967. Tom 2. 536 s.

14. Mahlis F. A. *Radiacionnaya fizika i himiya polimerov*. M.: Atomizdat, 1972, 328 s.

15. Gordienko V. P. *Radiatsionnoe modifizirovanie kompozitsionnykh materialov na osnove poliolefinov*. K.: Nauka dumka, 1985, 176 s.

16. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S.. *Perspektivy primeneniya silnotochnykh elektronnykh puchkov dlya radiacionnoj sshivki*

polietilena. Elektrotehnika ta elektromehanika. № 4. Harkiv 2013, S. 47-51.

17. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S. *Perspektivy primeneniya silnotochnykh impulsno-periodicheskikh indukcionnykh uskoritelej elektronov v proizvodstve kabelno-provodnikovoy produkci*. Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI», 2016. № 3 (1175), Energetika: nadijnist ta energoefektivnis. S. 47-59.

18. Novikov G. K. *Vliyanie radiacionnoj sshivki v elektricheskoy gazovom razryade na mekhanicheskuyu prochnost polietilenovoy kabelnoj izolyacii*. Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2017. Vol. 4, no. 2. S. 39-42.

19. Besprozvannykh A. V., Mirchuk I. A. *Korrelyatsiya mezhdu elektricheskimi i mekhanicheskimi harakteristikami kabeley s radiatsionno-modifitsirovannoy izolyatsiey na osnove bezgalogennoy polimernoy kompozitsii*. Elektrotehnika I Elektromehanika. 2018. № 4. S. 54-57.

20. Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A. *Distribution of absorbed dose by the perimeter and the length of the polymeric protective sheath at radiaculous irradiation of the ship cable*. PAST. 2019. № 5 (123), p. 44-48.

21. Kuksanov N. K., Fadeev S. N., Salimov R. A. i dr. *Tekhnicheskie sredstva uluchsheniya kachestva oblucheniya materialov uskoritelnyami ELV*. Pisma v EChAYa. 2014. T. 11. № 5 (198), S. 950-957.

22. Gromov N. I., Gromov M. N., Roykh A. I. i dr. *35-letnyy opyt innovatsiy radiacionnykh tehnologiy na zavode «Podol'skabel'»*. NDT World, 2018, v. 21, no. 1, pp. 52–55 DOI: 10.12737/article_5aaf998e73ab65.78306131.

23. Kobylko V. O., Polyakova I. V., Saruhanov V. Ya. i dr. *Radiacionnaya obrabotka pishevykh produktov zhivotnogo proishozhdeniya v celyakh obespecheniya prodovolstvennoy bezopasnosti voennoslužhashih*. Mezhdunarodnaya nauch.-prakt. konferenciya, pamyati V. M. Gorbato. Izd.–vo: "Federalnyy nauchnyy centr pishevykh sistem im. V. M. Gorbato" RAN (Moskva). №1, 2018, S. 106-110.

24. Alimov A. S., Bliznyuk U. A., Borschevskaya P. Yu. i dr. *Primenenie puchkov uskorennykh elektronov dlya radiatsionnoy obrabotki produktov pitaniya i biomaterialov*. Izvestiya RAN. Ceriya fizicheskaya, 2017, tom 81, № 6, S. 820–82.

25. Pat. 131551 UA, MPK (2018.01) H05H 15/00 G21K 1/00. *Sistema shvidkogo zahistu pri visokovoltnih probayah dlya priskoryuvachiv elektroniv ELV-1, ELV-2*. S. O. Bandurov, u201806193; Zayav. 04.06.2018; Opubl. 25.01.2019, Byul. № 2.

26. Bandurov S. O., Lozhkin R. S., Shishkin G. O. *Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil*. VANT. 2019. № 4 (122). p. 169-173.

Надійшла (received) 18.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бандуров Сергій Олегович (Бандуров Сергей Олегович, Bandurov Sergey Olegovich) – аспірант кафедри фізики та методики навчання фізики, Бердянський державний педагогічний університет; м. Бердянськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0377-985X>; e-mail: sbandurov91@gmail.com

Ложкін Руслан Сергійович (Ложкин Руслан Сергеевич, Lozhkin Ruslan Sergeevich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5049-514X>; Україна; e-mail: rslozhkin@gmail.com

Шишкін Геннадій Олександрович (Шишкин Геннадий Александрович, Shyshkin Gennadiy Aleksandrovich) – доктор педагогічних наук, доцент, Бердянський державний педагогічний університет, професор кафедри фізики та методики навчання фізики; м. Бердянськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2617-6699>; e-mail: ur3qugs@gmail.com